

脆性破壊に関する数理学的研究

著者	市川 昌弘
号	101
発行年	1966
URL	http://hdl.handle.net/10097/8829

第2章 多結晶固体の脆性破壊の巨視破面進行方向

多結晶鋼材の脆性破壊の巨視破面方向は引張り破壊では試片軸にほぼ垂直になり、捩り破壊では試片軸方向と約 45° 傾いたらせん状をなすことが実験的に明らかにされている。ここでは巨視破面方向と微視機構の関係についてしらべた。第1図のような巨視破面形成の模型を考える。結晶粒 G_0 に発生した初生マイクロクラック P_0 、 P_0 が隣接粒に次々と伝播していく。粒 G_n ($n=1, 2, \dots$) を横切る段階 (これを第 n 段階とよぶ) の伝播方向は G_n の劈開面のうちでそのときのクラック先端 P_{n-1} にて最大引張り応力の作用する面に一致するものと仮定する。この模型により体心立方格子の場合につき2次元の取扱いにより巨視破面方向を解析した (種々の方位の初生マイクロクラックについて各段階の伝播方向を確率論的に計算する)。この解析結果により上記の巨視破面方向の実験結果が極めてよく説明される。又、本理論によれば巨視破面方向は破壊の核となる初生マイクロクラックの方位に無関係に巨視応力型式のみによって決まる。この結果は初生マイクロクラックの形成がどのような微視機構ないし転位模型に従うにしても巨視破面方向はそれとは無関係に粒状組織を考慮に入れた連続体力学的因子によって規定されるという意味でも重要である。

第3章 応力勾配ある場合のすべり帯による応力集中

巨視応力勾配ある場合の脆性破壊強度が最大応力だけで決まるものではないことが実験的に示されている。そこで、この問題に関連して応力勾配下でのすべり帯による応力集中を無限小転位の連続分布の概念²⁾にもとづいて解析した。すべり帯 ($y=0, 0 < x < a, x=a$ が転位の集積点) に作用する任意の不均一剪断応力 $\tau(x)$ を $\tau(x) = \tau_m + \tau_2(x)$, $\tau_m = (1/\pi) \int_0^a [\tau(x)/\sqrt{x(a-x)}] dx$ と分解する。このとき $\tau_2(x)$ は $\int_0^a [\tau_2(x)/\sqrt{x(a-x)}] dx = 0$ なる条件を満足し、 $\tau_2(x)$ に対する転位分布は集積をおこさず $x=a$ とその近傍に応力集中を生じないことが示される。よって、任意の不均一剪断応力 $\tau(x)$ のもとでの応力集中は $\tau(x)$ の最大値には無関係に $\tau(x)$ の上記の付重平均値 τ_m によって決まることが結論される。この結果は巨視応力勾配の脆性破壊強度への影響の問題の微視理論的解明に対する手がかりになるとと思われる。

第4章 平行なすべり帯の相互干渉とその応力集中

多結晶固体の脆性破壊においてすべり帯による応力集中が重要な役割を果たすことはよく知られているが、このすべり帯はたゞ一本のすべり線から成っているものではない。従ってすべり線同

志の相互干渉が応力集中に及ぼす影響をしらべることがきわめて必要である。これについて Stroh³⁾らの研究があるが完全ではない。ここでは無限個，2個，3個の平行な刃状すべり線（応力分布一様）について，無限小転位の連続分布の概念にもとづき解析を行なった。第2図に結果を示す。實際上重要な間隔の狭い場合，応力集中はすべり線数に強く依存することがわかる。

第5章 同一平面上の転位クラックの相互干渉とその脆性破壊強度に及ぼす影響

脆性破壊の転位クラック模型がいくつか提案されているが転位クラック同志が相互に近接している場合についてはしらべられていない。ここでは同一平面上の転位クラックの相互干渉とその脆性破壊強度への影響を転位の連続分布模型の方法によって解析した。2個のクラックの引張りに対する解析結果を第3図に示す。相互干渉による破壊強度の最大低下率は Bullough-Gilman 型クラックの場合約30%で，これは弾性クラックの場合とほぼ等しい。

第6章 間隔の狭い平行弾性クラックの相互干渉と脆性破壊強度への影響

多結晶鋼材の脆性破壊において破壊前に結晶粒径程度の大きさのマイクロクラックが多数形成されることが実験的に明らかにされている。ここでは間隔の狭い平行弾性クラックの相互干渉とその脆性破壊強度への影響を転位の連続分布模型の方法により解析した。第4図に無限個のクラックの引張り及び2個のクラックの longitudinal Shear に対する解析結果を他の荷重型式及び間隔の広い場合に対する従来の結果と併せ示した。クラックが無限個の場合の破壊強度は間隔の狭い場合にも，広い場合と同様に，引張り及び longitudinal Shear では単一の場合よりも高くなり，せん断の場合には低くなることがわかる。又，この解析により平行クラックによる応力集中と多重切欠きによる応力集中との類似性が明らかにされた。

第7章 亀裂先端に塑性流動を伴う脆性破壊のクリテリヤ

亀裂先端に塑性流動を伴う脆性破壊について Bilby⁴⁾は弾塑性クラック模型にもとづいて塑性変位の限界値を破壊条件とする理論を導いているが，その物理的意義は明らかでない。⁵⁾そこで，エネルギー条件によりこの種の破壊のクリテリヤをしらべた。亀裂先端の塑性域を含めて一つの弾性クラックで近似してこの種の亀裂の伝播によるエネルギー変化の式を導き，これよりこの種の破壊の不安定性について新しい知見を得た。

第 8 章 結 論

(1)多結晶固体の脆性破壊の巨視破面形成の理論的模型を提案した。この模型による解析結果によって引張り破壊、振り破壊における巨視破面方向の実験結果がきわめてよく説明される。

(2)本理論によれば巨視破面方向は巨視破壊の核となる初生マイクロクラックの方位には無関係に巨視応力型式のみによって決まることが結論される。この結果は初生マイクロクラックの形成がどのような微視機構ないし転位模型に従うにしても巨視破面方向はそれと無関係に粒状組織を考慮に入れた連続体力学的因子によって規定されるという意味でも重要である。

(3)任意の不均一剪断応力 $\tau(x)$ のもとでのすべり帯による応力集中は $\tau(x)$ の最大値には無関係に、 $\tau(x)$ の付重平均値 τ_m (第 3 章参照) によって決定される。この結果は脆性破壊強度に及ぼす巨視応力勾配の影響の問題の微視理論的解明に対する手がかりになるとと思われる。

(4)平行すべり線の相互干渉とその応力集中をしらべ、すべり線長さ、間隔、数による応力集中の変化特性を明らかにした。

(5)同一平面上の転位クラックの相互干渉とその脆性破壊強度への影響をしらべ、クラック相互間の距離と強度の関係を明らかにした。

(6)平行弾性クラックの相互干渉とその脆性破壊強度への影響をしらべ、破壊強度とクラック長さ、間隔の関係、相互干渉効果の荷重型式依存性、平行クラックによる応力集中と多重切欠きによるそれとの類似性を明らかにした。

(7)亀裂先端に塑性流動を伴う脆性破壊のクリテリヤをエネルギー条件によってしらべ、この種の破壊の不安定性について新しい知見を得た。

終りに臨み、本研究課題をお与え下さり終始御懇切な御指導を賜った指導教育横堀武夫教授に厚く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 横堀, 「材料強度学」(岩波全書), (1964)P. iii.
- 2) A. K. Head and N. Louat, Australian J. Phys., Vol. 8 (1955) P.
- 3) A. N. Stroh, Proc. Roy. Soc., Ser. A, Vol. 232 (1955) P. 548.
- 4) B. A. Bilby, A. H. Cottrell and K. H. Swinden, Proc. Roy. Soc., Ser. A, Vol. 272 (1963) P. 304.
- 5) 横堀, 日本金属学会会報 Vol. 24 (1965) P. 441.

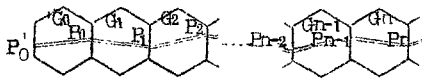
図 説 明

第1図・多結晶固体の脆性破壊の巨視破面形成の模型。

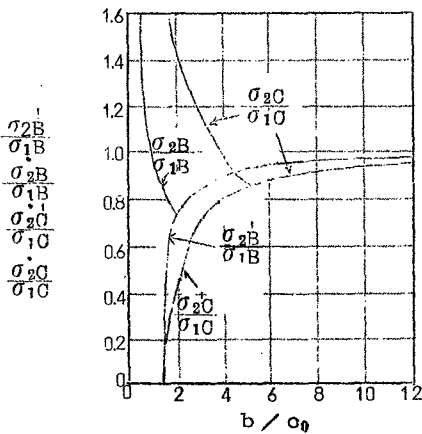
第2図・平行すべり線による応力集中・ $Ns_1, Ns_2, Ns_3^{(1)}, Ns_3^{(2)}, Ns_{\infty}$ はそれぞれ単一個, 2個, 3個(外側), 3個(内側), 無限個のすべり線の Stress intensity factor. h は間隔, a はすべり線長さ。

第3図・同一平面上の転位クラックの相互干渉と脆性破壊強度。 $\sigma_{1B}(\sigma_{1C}), \sigma_{2B}(\sigma_{2C})$ は Bullough-Gilman 型クラック (Cottrell型クラック) がそれぞれ単一個, 2個の場合の引張り破壊強度 ($\sigma_{2B}(\sigma_{2C})$ はクラックが2個の場合の伝播開始応力)。 b は2個のクラックの外側先端間距離の $1/2$ 。 c_0 は単一個の Bullough-Gilman 型クラックの伝播開始時の長さ。

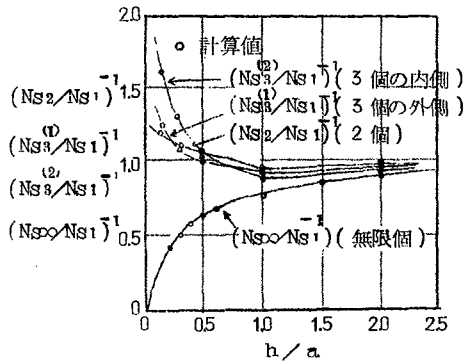
第4図・平行弾性クラックの相互干渉と脆性破壊強度。 $\sigma_{\infty}, \tau_{\infty}, \tau_{e\infty}(\tau_{e2})$ はクラックが無限個(2個)の場合のそれぞれ引張り, 剪断, longitudinal shear に対する破壊強度。 $\sigma_1, \tau_1, \tau_{e1}$ は単一個の場合の上記各荷重型式に対する破壊強度。 h は間隔, a はクラック長さの $1/2$ 。



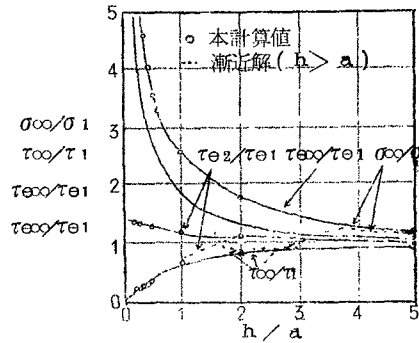
第 1 図



第 3 図



第 2 図



第 4 図

審 査 結 果 の 要 旨

材料の脆性破壊は機械構造物の設計や安全性などの面から近年重要な問題となつてきた。しかし現象が極めて複雑であるので、従来種々の異つた分野で研究が行われている。本論文は数理的アプローチによって脆性破壊における巨視破面方向と微視機構の関係、巨視応力勾配ある場合の破壊強度、すべり線の相互干渉と応力集中、弾塑性き裂の伝播などの重要諸問題の基礎を明らかにすることを目的としたものであり、8章よりなる。

第1章は諸論である。第2章では多結晶固体の脆性破壊の巨視破面形成方向の独自の理論的模型を提案している。この模型による解析結果によって引張り破壊、振り破壊における破面方向の実験結果がきわめてよく説明される。なお本理論によれば巨視応力の方向に対する巨視破面方向は巨視破壊の核となる初生マイクロクラックの方位には無関係に巨視応力型式のみによって決まることが結論される。この結果は初生マイクロクラックの形成がどのような微視機構ないし転位模型にしたがうにしても、巨視破面方向はそれと無関係に粒状組織を考慮に入れた連続体力学的因子によって規定されるという意味でも重要である。

第3章では任意の巨視的応力勾配のある場合におけるすべり帯の先端およびその近傍における応力集中を無限小転位の連続分布の概念にもとずいて解析したものである。その結果任意の不均一剪断応力 $\tau(x)$ のもとでの応力集中は $\tau(x)$ の最大値には無関係に $\tau(x)$ の付重平均値 τ_m によって決まることが明らかにされた。これは従来実験的法則にたよっていた脆性破壊強度への巨視応力勾配の影響という問題の微視理論的解明に対する新しい知見を与えたものと言える。

第4章は平行すべり線の相互干渉とその応力集中に関するものである。この応力集中のすべり線長さ、間隔および数による変化特性を明らかにした。

第5章は同一平面上の転位クラックの相互干渉とその脆性破壊強度に及ぼす影響の解析であり、クラック相互間の距離と破壊強度との関係を明かにした。

第6章は平行な弾性クラックの相互干渉とその脆性破壊強度に及ぼす影響を解析したものであり、ここではクラック長さ、間隔と破壊強度の関係を明かにした。また相互干渉によって引張りやlongitudinal shearでは破壊強度が単一個の場合により強化し、剪断では弱化的ること、および多重切欠による応力集中と弾性クラックによる応力集中との類似性を明かにした。

第7章はき裂先端に塑性流動をとまなり型、すなわち弾塑性破壊の場合の法則について検討したものであり、エネルギー条件によって破壊の不安定性についての新しい知見を得ている。第8章は結論である。

以上要するに本論文は脆性破壊における巨視破面進行方向の問題，巨視応力勾配のある場合の破壊強度，すべり線の相互干渉とその応力集中，弾塑性き裂伝播などの重要な問題の基礎を数理的に明らかにしたもので，機械工学上寄与するところが少くない。

よって本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。